

О.Ф. Саленко, П.Б. Поздняков, Т.О. Стефанович*
Кременчуцький державний політехнічний університет,
*Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра електронного машинобудування

ІНСТРУМЕНТ ІНТЕГРАЛЬНОЇ ДІЇ ДЛЯ ВИКОНАННЯ СТРУМИННО-АБРАЗИВНОГО ОЧИЩЕННЯ

© Саленко О.Ф., Поздняков П.Б., Стефанович Т.О., 2008

Розглянуті питання створення гідроструминних інструментів для поверхневої обробки (очищення) магістральних трубопроводів. Наведені типові конструкції соплових пристроїв, подані результати дослідження авторів зі створення інтегрованого струминно-абразивного пристрою роторного типу.

In the article the questions of creation of jet penetrations instruments are examined for superficial treatment (cleanings) of main pipelines. The constructions of models of devices of nozzles are resulted, the results of research of authors are presented on creation of the integrated stream-abrasive device of rotor type.

Актуальність роботи. Розвиток трубопровідної транспортної системи України розпочався в 60-ті роки ХХ-го століття і досяг свого піку наприкінці 70-х – на початку 80-х років. За кілометражем і продуктивністю нафтопровідний транспорт України належить до найрозвиненіших в Європі. Нині у зв'язку з тривалим періодом експлуатації нафтотранспортної системи актуальною є підтримка її працездатності виконання капітальних ремонтів. Основний обсяг робіт під час капітального ремонту магістральних нафтопроводів припадає на заміну ізоляційного покриття, яке стало непридатним (55–60 % від загального обсягу робіт). Очищення поверхні трубопроводу під час виконання капремонтів належить до одного з найбільш відповідальних і трудомістких видів робіт і полягає у видаленні з поверхні трубопроводу старої ізоляції, бруду і продуктів корозії. Ретельне очищення трубопроводу є неодмінною умовою одержання якісного ізоляційного покриття, адже ступінь очищення є основним чинником, що визначає адгезію.

Сьогодні найбільшого поширення набув механічний спосіб очищення поверхні труби, заснований на принципі зрізання старої ізоляції. Однак порівняння характеристик землерийної техніки й очисного пристрою доводить, що очисна машина є лімітуючою ланкою комплексу, що знижує його можливу продуктивність, а механічний спосіб видалення ізоляції призводить до ушкодження поверхневого шару тіла труби, порушує його міцність та значно здорожчує вартість ремонту.

Наведені вище причини, а також високе енергоспоживання обладнання і важкі умови праці обслуговуючого персоналу очисних машин, вимагають пошуку і впровадження альтернативних методів очищення поверхонь труб.

Світовий досвід виконання капітального ремонту лінійної частини трубопроводів свідчить про відмову провідних компаній від механічного методу очищення поверхні труби (насамперед із високим ризиком її пошкодження та ймовірністю іскроутворення). Там, де дозволяють кліматичні умови, найефективнішим та найбезпечнішим способом зняття практично будь-яких ізоляційних матеріалів є гідроочищення. Пристрої для гідроструминного видалення старої захисної плівки є роторними головками з кількома соплами і належать до пристроїв інтегральної дії (обертового типу).

У той же час, як зазначають виробники обладнання для виконання гідроочисних операцій, нагальною залишається проблема підвищення ефективності цього процесу за рахунок зниження його енергоємності, забезпечення високої якості очищення поверхонь і надійності обладнання.

До складу гідроочисних систем, які пропонуються на ринку, входять такі додаткові пристрої, як піскоструминні головки, камери висушування, камери контролю. Використання цих систем на

трасі потребує підняття на рівень ґрунту до 200 м труби та задіяння додаткових моторизованих труботримачів. Частково вдається автоматизувати очищення, забезпечуючи послідовно струминне видалення поверхневої плівки потужним рідинним потоком, струминно-абразивне оброблення поверхні, висушування, контроль напівавтоматичними пристроями або візуальними засобами. У разі виявлення дефектів на поверхні після очищення (невідшарованих ділянок, зон корозії тощо) комплекс зупиняється і повертається у попередню позицію для повторного виконання операцій.

Отже, підвищення ефективності та якості струминного очищення, яке може бути досягнуто за допомогою оптимізації процесу взаємодії струменя з оброблюваною поверхнею, розробки пристроїв та засобів інтегральної дії, а також відповідних технологій обробки, є важливою народногосподарською проблемою, вирішення якої дозволить значно скоротити витрати на обслуговування та експлуатацію магістральних трубопроводів, і знизить вартість газо- та нафтопродуктів, що особливо важливо для економіки України.

Мета і задача досліджень. Підвищення ефективності гідроочищення великогабаритних виробів струминними пристроями інтегральної дії комбінованого (струминного та струминно-абразивного) впливу.

Матеріал досліджень. Для виконання операцій струминного очищення сьогодні використовуються головки різних конструкцій.

Відомий пристрій для струминного очищення поверхонь твердих тіл [1], який складається із циліндричного корпусу з встановленим в ньому соплом постійної або змінної витрати, що сполучений з утримуючою трубкою підведення рідини високого тиску співвісно. Пристрій також оснащений елементами центрування та фіксації сопла, які з'єднуються з корпусом.

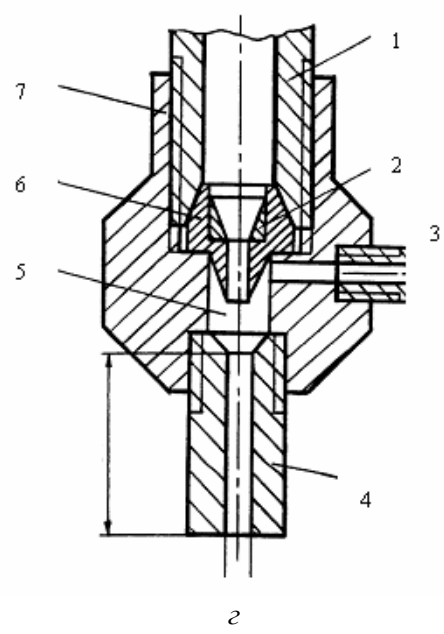
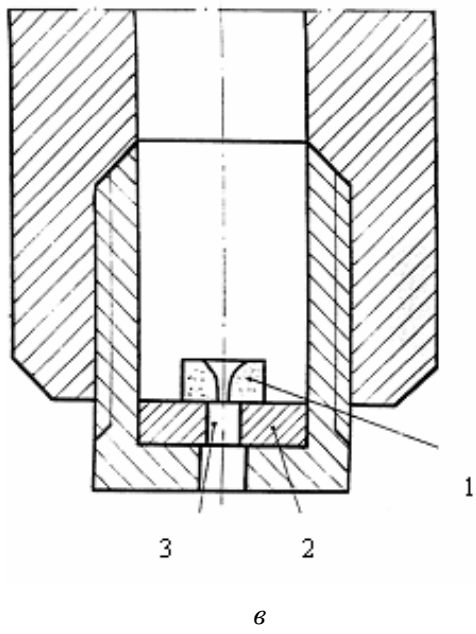
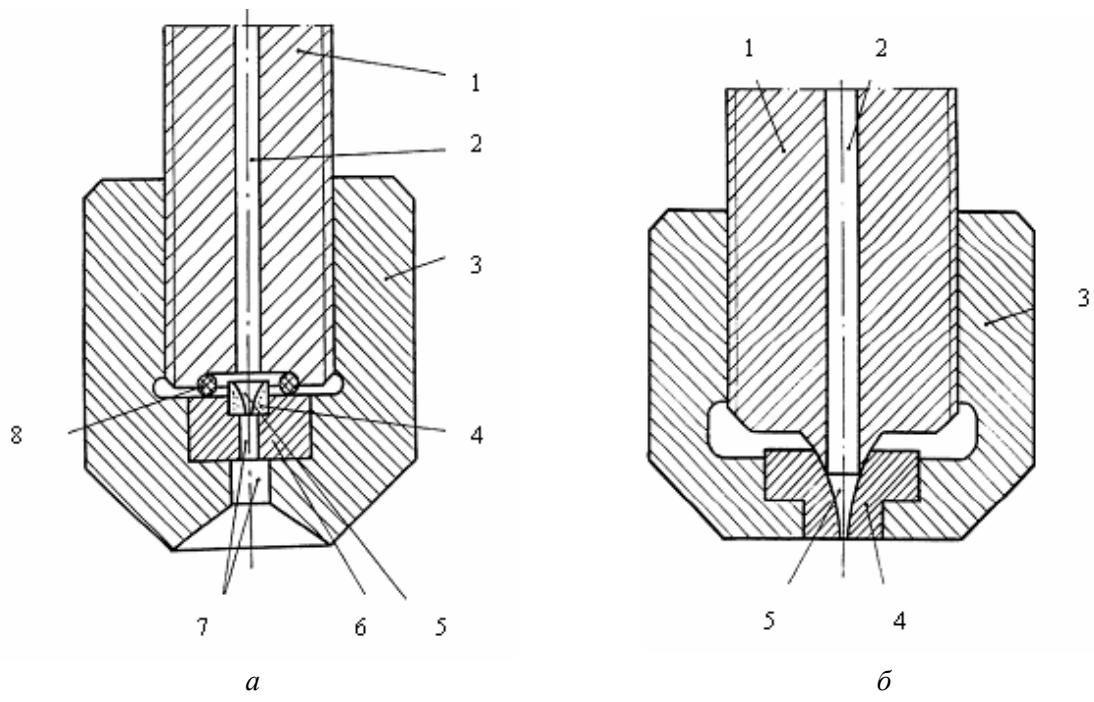
Отриманий за допомогою такого пристрою струмінь рідини використовується для виконання мийних або гідрорізальних операцій.

Недоліком такого пристрою є те, що продуктивність процесу очищення від забруднень і видалення поверхневої плівки, яка залежить від площі контакту ядра струменя та інтенсивності струминного впливу, є достатньо малою, а для очищення довгомірних поверхонь необхідне інтенсивне і щільне переміщення пристрою уздовж поверхні, яка обробляється. Іншим недоліком є висока імовірність виявлення залишків забруднення післяструминного впливу (внаслідок того, що струмінь володіє спроможністю вибірково "оминати" міцніші фрагменти та адгезійні сполуки). Конструктивно (рис. 1, а) такий пристрій складається із штуцера 1 з підвідним каналом 2, струменеформуєного сопла 4 з каналом 5, в якому відбувається формування різального струменя рідини, ущільнювального елемента 8 та накидної гайки 3. Інколи для зручності складання використовують установочну втулку 6. У накидній гайці, а також у втулці є отвори 7, які виконані співвісно зі струменеформувальним каналом 5.

Інше конструктивне виконання зазначеного пристрою показано на рис. 1, б. Він також складається із штуцера 1 з підвідним каналом 2, сопла 4 із струменеформувальним каналом 5 та накидної гайки 3. До переваг цієї конструкції потрібно зарахувати плавність переходу підвідного каналу 2 у струменеформувальний 5. Але сопло такої конструкції надто складне у виготовленні; у разі встановлення його у штуцер необхідно регулювати силу затиску з метою запобігання руйнуванню.

Ще одне конструктивне виконання пристрою для струминного різання або очищення поверхні дає можливість забезпечити швидкозмінність самого сопла, а також запобігати руйнуванню сопла внаслідок дії тиску рідини.

Спосіб встановлення струменеформувального сопла в насадку повинен забезпечити його швидкозмінність, яка необхідна у разі виходу сопла з ладу. Крім того, технічні камені та надтверді матеріали, з яких виготовляються сопла, є доволі крихкими, тому необхідно створити мінімальне навантаження на сопло з боку насадки. У насадках із соплами з високоміцного матеріалу, як правило, витримуються майже всі зазначені вимоги, крім вимоги про плавність переходу між каналами, що здебільшого спричинено наявністю між підвідним 2 та струменеформувальним 5 каналами зони, діаметр якої більший за діаметр підвідного каналу.



д

Рис. 1. Типові схеми і конструкції струминних та струминно-абразивних інструментів

Здебільшого така конструктивна особливість спричиняє втрату тиску та порушення неперервності потоку рідини. Подолати зазначений недолік можна, забезпечивши ідеальне стискання потоку, коли діаметр підвідного каналу набагато більший за діаметр отвору, з якого рідина витікає, а вхід до струменеформувального каналу має плавні контури. Одну з таких конструкцій показано на рис. 1, в. Однак варто зазначити, що вільне встановлення сопла на плиті 2 зумовлює труднощі під час його заміни, зумовлені можливістю порушення співвісності струменеформувального 1 та випускного 3 отворів.

Відомий пристрій, який складається із корпусу 7 (рис. 1, з, д), в якому виконана порожнина 5, в яку входять два канали, що перетинаються під певним кутом: канал подачі рідини та канал підведення абразиву 3, причому на виході з каналу подачі рідини встановлено калібрувальну циліндричну трубку 4, а на вході цього самого каналу встановлено сопло 6 з елементами кріплення та центрування 2; корпус 7 жорстко з'єднаний із утримувальною трубкою 1 для підведення рідини під високим тиском.

Під час подачі рідини під високим тиском за рахунок явища ежекції в змішувальній камері створюється розрідження і відбувається засмоктування і захоплення абразиву струменем рідини. Тоді крізь калібрувальну трубку протікає абразивно-рідинний струмінь. Ефективність операції очищення значно зростає порівняно із схемою, показаною на рис. 1, а. Недоліком цього пристрою є мала площа контакту ядра струменя із оброблюваною поверхнею, а також імовірність шаржування в поверхневий шар оброблюваного матеріалу зерен абразиву (зокрема кремнію), яке буде погіршувати зчеплення захисних плівок з трубою.

Перспективним є пристрій інтегральної дії, показаний на рис. 2, а. [2].

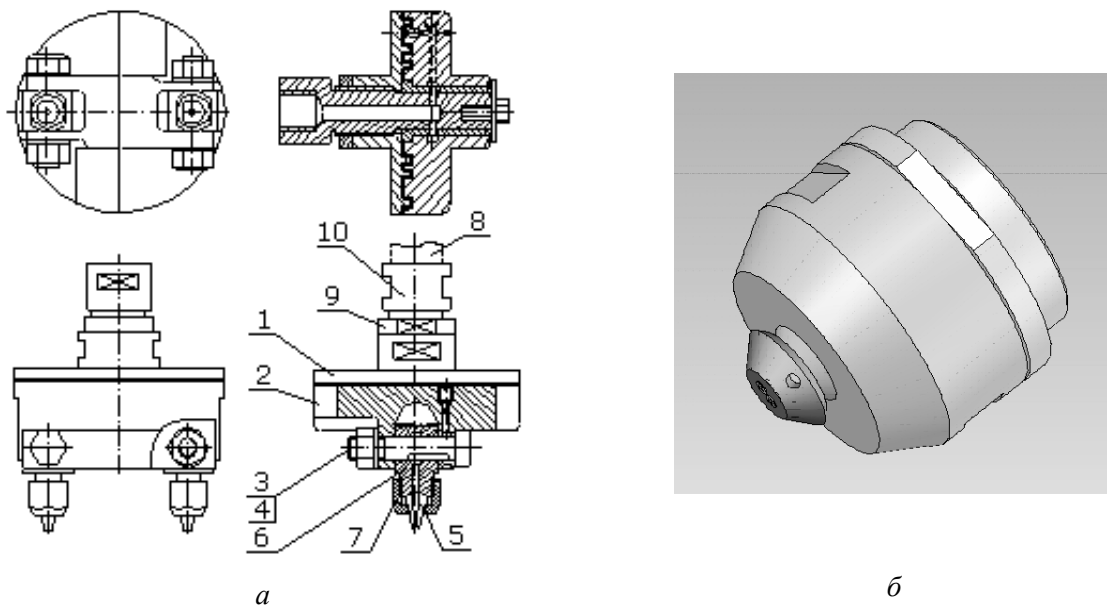


Рис. 2. Конструкції роторних головок:
а – без привода обертання; б – з приводом обертання

Цей пристрій працює так. Корпус 1, нерухомо закріплений на трубці 8 для підведення рідини під високим тиском. На корпусі встановлений ротор 2, який має змогу обертатися довкола осі “трубка-корпус” так, що рідина через отвір трубки та корпусу надходить до основного каналу ротора 2, і далі по каналах ротора прямує до сопел, встановлених на передньому торці ротора, причому осі сопел перехрещуються з віссю ротора під невеликим ($3-5^{\circ}$) кутом в напрямку прогнозованого обертання ротора. Таких сопел може бути декілька. Інструмент інтегральної дії запропонованої конструкції забезпечує високу продуктивність завдяки роботі кількома струменями, які одночасно обертаються навколо осі ротора. Процес очищення відбувається аналогічно до торцевого фрезерування. Особливість цієї конструкції полягає в тому, що, маючи декілька сопел,

можна змінювати величину кута між осями струменів. Обертання навколо осі головка отримує за рахунок реактивної сили, яка виникає під час витікання струменів з сопел, встановлених під кутом до нормалі площини обертання.

Пристрій складається із корпусу 1, на якому встановлений ротор 2 з двома штуцерами 5, розташованими в його пазах та закріпленими за допомогою болтів 3. На кожному штуцері за допомогою накидної гайки 7 зафіксоване сопло 6. Загалом головка закріплюється на трубі за допомогою муфти 10 та контргайки 9. Кут витікання струменів можна змінювати, повертаючи на болтах 3 штуцери 5. Це дає змогу забезпечити необхідну інтенсивність гідроструминного впливу для заданої робочої подачі головки (швидкості її руху щодо оброблювальної поверхні).

Недоліком цього пристрою є відсутність можливості змішування рідинного потоку з потоком абразиву, і, відповідно, неякісне очищення поверхонь труб, як і у разі застосування пристрою [1].

Розглянутий пристрій інтегральної дії не має приводу обертання, і обертовий момент забезпечується за рахунок реактивної сили схрещених струменів. Це не дає змоги регулювати частоту обертання ротора, а тому погіршується якість очищеної поверхні та ефективність виконання мийних операцій. На рис. 2, б, показано роторну головку, яка має вбудований привод у вигляді турбінки, що надає обертового руху ротору із розташованими на ньому соплами.

Складність та нестационарність процесів, одночасна взаємодія деякої кількості елементів, що мають певні функціональні характеристики, зміна фізико-механічних властивостей плівки внаслідок її старіння і деструкції та відсутність системного підходу до створення конструкцій очищувальних пристроїв потребують виконання морфологічного аналізу, спрямованого на виявлення оптимальних конструктивних рішень, які б дозволили виконувати подібну обробку ефективно, якісно та надійно.

Попередніми дослідженнями для струминного та гідроабразивного очищення встановлено, що:

- струминне очищення поверхні ефективне у тих випадках, коли плівка має квазікрихкі властивості, або вона значно пошкоджена на межі адгезійного контакту покриття із поверхнею (наприклад, внаслідок корозії матеріалу труби тощо);
- струмінь задовільно знімає високоеластичні або в'язкі плівки великої товщини;
- струмінь рідини не видаляє високоміцні плівки, а також поверхневі утворення (наприклад, окалину, оксидну плівку, іржу).
- гідроабразивний струмінь ефективно та надійно видаляє будь-яку міцну плівку з поверхні труби незалежно від її товщини. При цьому частково змінюється мікрорельєф поверхні;
- гідроабразивний струмінь не видаляє покриття з еластичних та в'язких плівок, оскільки зерна абразиву застрягають у плівці.

Отже, метою синтезу гідроструминного інструмента інтегральної дії є створення такого компактного та надійного пристрою, який забезпечив би ефективне виконання мийних операцій за умови мінімізації енергетичних витрат на створення потоку рідини з високим тиском. Створений інструмент повинен виконувати операції зняття будь-яких поверхневих плівок, а технологія – забезпечувати точне та стабільне забезпечення оптимальних режимів ведення обробки.

Зазначеної мети досягають тим, що у запропонованому пристрої інтегральної дії для виконання струминної обробки, який складається з корпусу, ротора, сопел та утримувальної трубки, новим є те, що в утримувальній трубці нерухомо встановлена співвісна трубка подачі абразиву меншого діаметра, яка зовнішньою поверхнею контактує із елементом бокового підведення рідини високого тиску, жорстко з'єднаним із утримувальною трубкою, а кінцями контактує, з одного боку, з магістраллю подачі абразиву, а іншим – входить у додатковий центральний отвір ротора, утворюючи з ним змішувальну камеру, на кінці якої нерухомо закріплена калібрувальна трубка у вигляді однотипних сегментних елементів, стикованих у жорстко усталеному на роторі бандажі, причому потік рідини високого тиску регульовано поділяється між боковими струминними соплами та центральним струминно-абразивним соплом, а сам ротор забезпечує усталення сопел так, що осі струменів схрещуються з центральною віссю утримувальної труби і можуть перетинатися у зоні натікання струменів на оброблювану поверхню на відстані, яка дорівнює приблизно двом діаметрам сопла.

Сполучення ротора периферійно розташованими соплами, змішувальної камери із калібрувальною трубою, розташованою на центральній осі ротора, надає пристрою нових ознак, а саме підвищення надійності видалення міцних забруднень та зменшення кількості шаржованих абразивних зерен у поверхневий шар оброблюваного матеріалу після виконання операції. Висока продуктивність обробки забезпечується використанням обертового ротора з соплами, які створюють періодичне пряме та косокутове навантаження малої (що дорівнює приблизно двом діаметрам сопла) ділянки обробленої поверхні. Висока ефективність видалення міцних фрагментів плівки забезпечується використанням абразивно-рідинного струменя. Усунення шаржування абразивних зерен у матеріал поверхні труби досягається тим, що абразивно-рідинний струмінь знаходиться між струменями, в яких відсутній абразив і які обертаються з великою швидкістю, тобто кінцевий вплив на поверхню здійснюють саме ці струмені.

Будова пристрою показана на рис. 3.

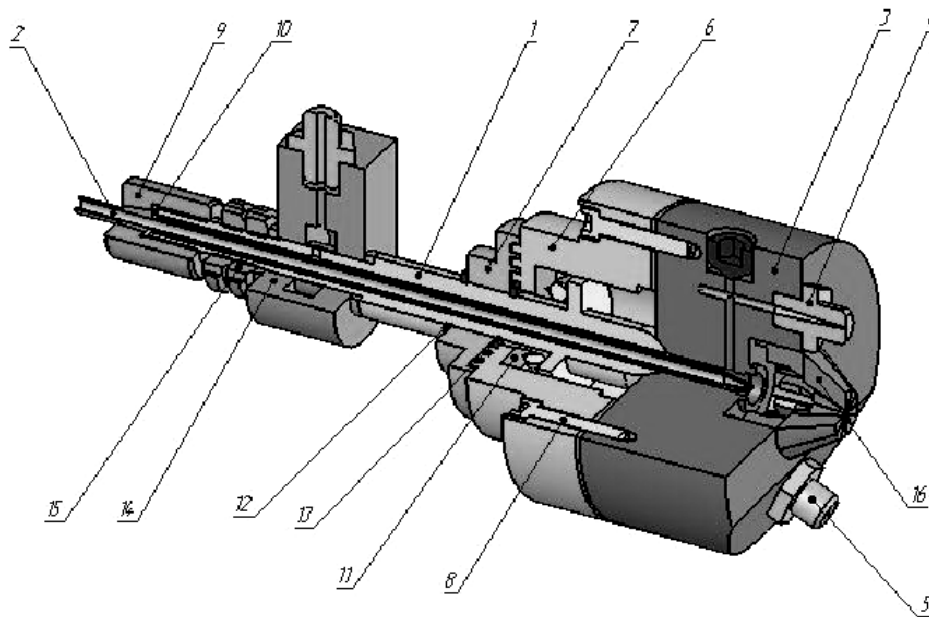


Рис. 3. Роторний очищувач з гідроабразивним соплом

Пристрій складається з утримувальної труби 1, яка має сферичний кінець. На ній встановлений упорно-радіальний підшипник 11, за допомогою якого утримувальна труба 1 сполучається з виконаним з можливістю обертання навколо осі труби 1 корпусом 6, жорстко з'єднаним за допомогою гвинтів 8 із ротором 3, який має можливість обертатися на конічній розточці пояса і контактує зі сферичним кінцем труби 1. Ротор 3 має канали – центральний, який утворює змішувальну камеру, і бокові для підведення рідини до сопел 4 та 5, розташованих в торці ротора так, що осі сопел 4 і 5 знаходяться на певних відстанях від осі труби 1 і схрещуються з нею під кутом $3-5^{\circ}$, що забезпечує виникнення реактивного моменту для обертання ротора, а між собою перетинаються під кутом, який забезпечує на певній відстані до обробленої поверхні періодичне струминне навантаження поверхні з кроком, що приблизно дорівнює двом діаметрам сопла, та радіальні канали, що сполучають змішувальну камеру з боковими каналами. В середині утримуючої труби 1 співвісно з нею розташована трубка 2 для подавання абразиву, яка одним кінцем сполучена з конічним фіксуєчим елементом 10, який контактує з утримуючою трубою 1 та ковпачковою гайкою 9 так, що регулювання розташування трубки подавання абразиву 2 відносно торця центрального отвору ротора 3 забезпечується її переміщенням уздовж осі та фіксацією гайкою 9, а інший кінець трубки 2 виконаний у вигляді сопла, яке входить у центральний отвір ротора 3, в якому з торця ротора змонтоване сегментне сопло 16 з підтисненням потоку рідини. На корпусі 6 з протилежного від ротора боку виконане лабіринтне ущільнення 13, яке разом із елементом 7,

встановленим на трубі 1 та зафіксованим кільцем 12, забезпечує ущільнення обертової частини пристрою. Додатково на центральній трубі 1 змонтований блок 14 підведення рідини з високим тиском, закріплений гайками 15, кільцевий канал якого сполучається із отвором труби 1.

Пристрій працює так. Після подачі рідини через канал блока 14, вона надходить до отвору труби 1 і далі прямує до змішувальної камери ротора 3, в якій утворений потік поділяється і надходить крізь радіальні отвори до бокових сопел 4 та 5, а через змішувальну камеру до сопла 16. Одночасне подавання абразивної суспензії до каналу трубки подавання абразиву 2 призводить до того, що за рахунок ежекції у змішувальній камері абразивні частинки підхоплюються потоком рідини, розганяються, і за допомогою сопла 16 формується рідинно-абразивний струмінь. За рахунок того, що сопла 4 та 5 виконані зі схрещеними осями, під час стікання струменів рідини виникає реактивний момент, який надає обертового руху ротору 3 та зв'язаному з ним корпусу 6. Обертовий рух ротора призводить до того, що оброблювана поверхня сприймає струминне навантаження від струменів рідини, які рухаються по кільцевій траєкторії, один з яких натікає на перешкоду практично у перпендикулярній площині, а інший є косокутовим, так і від нерухомого у площині оброблюваної заготовки струминно-абразивного потоку.

Таке поєднання призводить до технічного результату: отримання якісного очищення поверхні за рахунок поєднання періодичного струминного та струминно-абразивного впливу; відсутність шаржування зерен абразиву в матеріал поверхні внаслідок того, що абразивно-рідинний швидкоплинний потік знаходиться всередині струменів чистої рідини, що обертаються із великою швидкістю.

За результатами досліджень виготовили та випробували струминно-абразивну головку зазначеної конструкції.

Випробовували:

- 1) стандартний моноструминний абразивний очищувач із системою подавання абразиву ежекційного типу (рис. 4, а);
- 2) роторний очищувач з двома струминними соплами (рис. 4, б);
- 2) роторний очищувач фірми WOMA з двома соплами (рис. 4, в);
- 3) пропонуваній роторний очищувач.

Джерелом живлення високого тиску використовували помпову станцію WOMA PH-120, налагоджену на тиск 100 МПа, витрату рідини до 45 дм³/хв., що достатньо для живлення двох сопел діаметром 1,8 мм або струминно-абразивного пристрою.

Витрату енергії фіксували за споживаною потужністю лічильником типу СЧЗ-100-ВНР-П УХЛ4 з похибкою вимірювання не більше 3 % в діапазоні 0,5–100 кВт·год.

Ступінь очищення досліджували візуально за допомогою лупи з 8-кратним збільшенням та на оптичному мікроскопі МИМ-8. Стан поверхневого шару визначали за контрольними зірцями на електронному мікроскопі РЕМ-106, присутність абразивних зерен у матеріалі поверхні – енергодисперсійним аналізом (ЕДАР з ППП “Магеллан 2.2”).



а



б

Рис. 4. Використовувані під час випробувань очищувачі:

а – моносопловий струминно-абразивний очищувач безперервної дії; б – пристрій подавання абразиву з бункеру



в

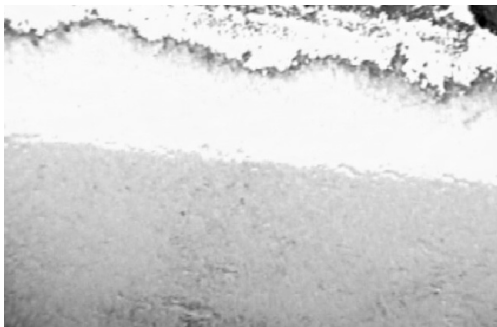
Рис. 4. (Продовження). Використовувані під час випробувань очищувачі:
в – роторний двосопловий струминний пристрій

Результати досліджень наведені в таблиці.

Результати досліджень для різних очищувачів

№ з/п	Тип головки	Показники якості обробки				Показники ефективності		Примітка
		s	k_{Ra}	k_{σ}	R_{z} , мкм	F , м ²	N , кВт	
1	моноструминний гідроабразивний очищувач	0,003	0,75	1,1	40...80	4,2	6,5	матовий блиск
2	роторний очищувач	0,12	1,0	1,0	-	12,8	13,8	чорна поверхня, жиров. залишок
3	очищувач WOMA	0,11	1,0	1,0	-	14,9	15,5	чорна поверхня, жиров. залишок
4	пропонований очищувач	0,003	0,88	1,05	40	13,1	12,2	матовий блиск

Дослідження виконувались під час очищення вручну протягом 10 хв. Вид очищеної поверхні (гідроструминним роторним пристроєм та запропонованим пристроєм) показано на рис. 5, а, б.



а



б

Рис. 5. Вигляд очищеної поверхні:
а – струминно-абразивним пристроєм; б – струминним пристроєм

Ефективність визначали за ознакою питомої витрати енергії на виконання очищення одиниці площі з урахуванням наявного залишку.

При цьому брали до уваги, що залишок плівки на поверхні потребує додаткових витрат енергії та часу. Отже, розрахункова формула набула вигляду

$$E = \frac{N}{F}(1 + s)$$

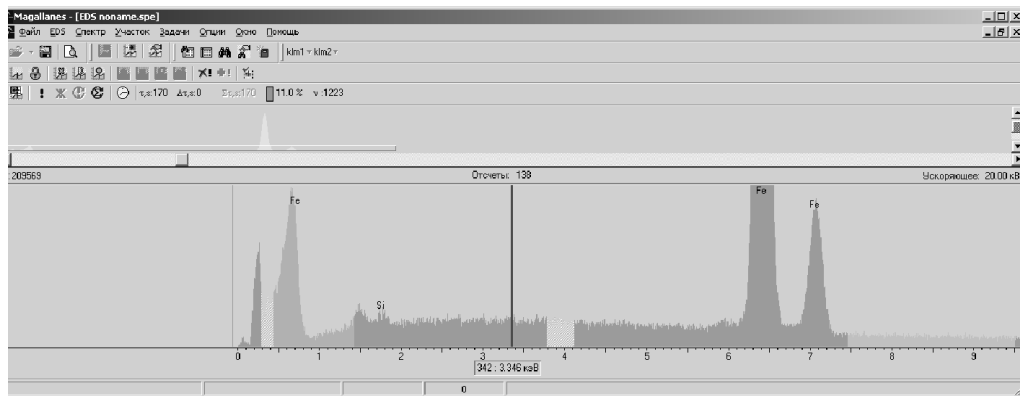
де E – енерговитрати під час очищення, кВт/м²; N – потужність, яка витрачена робочим пристроєм, кВт; F – очищена площа, м²; s – коефіцієнт, який враховує додаткові витрати енергії на зняття залишку плівки.

Для типів головок, наведених у таблиці, відповідно, маємо: $E_1 = 1,55$ кВт/м²; $E_2 = 1,207$ кВт/м²; $E_3 = 1,144$ кВт/м²; $E_4 = 0,98$ кВт/м²;

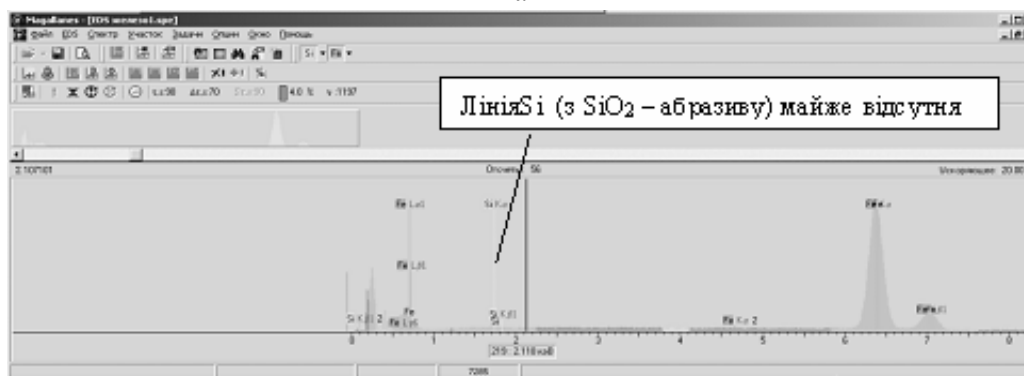
Отже, беручи до уваги подані показники, можемо зробити висновок, що найкращим є інструмент запропонованої конструкції.

Якість очищення та присутність абразивних зерен у матеріалі поверхні перевіряли візуально на РЕМ-106 та за допомогою виконання рентгенівського енергодисперсійного аналізу з використанням ППП “Магеллан 2.2”.

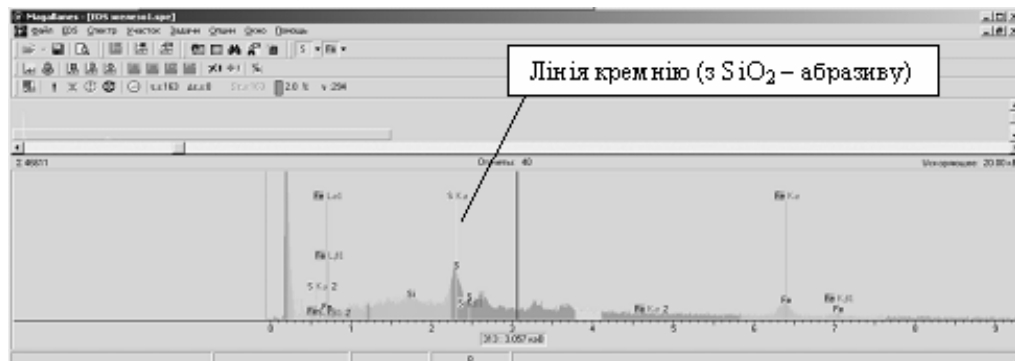
Так, для двох зразків, оброблених за традиційною технологією, яка передбачала гідро-струминне очищення з подальшим пікоструминним очищенням, а також за допомогою запропонованого пристрою за один прохід (одночасна обробка струминно-абразивним пристроєм) отримано спектрограми (рис. 6).



а



б



в

Рис. 6. Характерні спектри поверхневого шару: під час обробки гідроабразивним струменем (а), пропонованим струминно-абразивним роторним пристроєм (б) та за існуючою технологією (в)

На рис. 6, а показано спектрограму, отриману для випадку струминно-абразивної обробки поверхні. Дослідження виконували для 10 точок поверхні, довільно обраних на взірці (координати точок визначали за допомогою генератора випадкових чисел), далі експериментальні дані усереднювали і обробляли методами статистики. З рис. 6, а очевидно, що на поверхні сталевого взірця присутній кремній, який входить до складу оксиду SiO_2 , що його використовували як абразив. Кількісний аналіз довів, що частка речовини на поверхні незначна і знаходиться у межах 0,08 %.

Спектрограма, показана на рис. 6, б, доводить, що використання запропонованого пристрою майже повністю усуває присутність зерен абразиву в матеріалі обробленої поверхні, тобто можна припустити, що зерна абразиву, які залишилися на поверхні, видаляються рідинним струменем, що ковзає по ній, тобто вода майже повністю вимиває абразив (частка менша за 0,001 %).

Спектрограма, показана на рис. 6, в, виконана для взірця, обробленого за традиційною технологією (тобто у два проходи – струминним очищенням та піскоповітряною обробкою), свідчить про те, що у такому разі вміст кремнію в матеріалі поверхні є максимальним і становить 0,1 %.

Отже, запропонований пристрій, крім наведених вище переваг, дає змогу майже повністю усунути залишок зерен абразиву в матеріалі обробленої поверхні. Це підвищує якість підготовленої під нанесення захисного покриття поверхні.

Висновки. Виконані дослідження довели, що запропонований пристрій є високоефективним абразивно-струминним інструментом інтегральної дії, а поєднання струминного та струминно-абразивного сопел дає змогу практично повністю усунути недоліки, властиві традиційним інструментам.

Його використання дозволяє скоротити енергетичні витрати під час очищення поверхонь в 1,2–1,5 рази та зменшити присутність абразивних зерен у матеріалі очищеної поверхні у 80–100 разів порівняно з традиційними інструментами.

Цей пристрій можна використовувати під час ремонтів магістральних нафтопроводів та під час виконання аварійно-відновлювальних робіт.

1. Саленко О.Ф., Петко І.В., Третьяков О.В. Гідро- та гідроабразивна обробка: теорія. Технологія та обладнання. – К.: ІЗМН, 1998. – 488 с. 2. Струтинській В.Б. Математичне моделювання процесів і систем: Підручник для студентів ВТУЗів. – Житомир: Видавництво ЖІТІ, 2006. – 520 с.